文章编号： 1007-4627(2024) 03-0001-08

弱束缚原子核破裂反应机制研究

吴艳松[1]，张高龙[1]，张广鑫[2]，林承键[3]，杨 磊[3]，吕昊博[1]，焦振威[1]，王明李[1]

(1. 北京航空航天大学物理学院，北京 100191；
2. 中山大学中法核工程与技术学院，广东珠海 519082；
3. 中国原子能科学研究院，北京 102413)

摘要：近库仑势垒附近发生的核反应是研究核结构与反应动力学相互作用的一个有效途径。随着加速器的发展，越来越多的奇特核可以被产生，因此进一步去理解弱束缚能对于反应动力学和熔合反应的影响是至关重要的。目前大量的实验表明 ^{6,7}Li 和 ^{9}Be 等稳定弱束缚核与重质量靶核的完全熔合截面与已有的理论模型计算的熔合截面以及紧束缚核体系推导出的熔合截面相比要低 30% 左右。为了探究弱束缚核的破裂对完全熔合截面压低的作用，研究弱束缚核的破裂效应与破裂机制便成为人们一个新的关注区域。本文将对近期国内外相关的弱束缚核破裂反应工作进行介绍，包括本课题组在此方面的工作。

关键词：弱束缚核；完全熔合截面；压低因子；破裂反应

中图分类号：O571.53 **文献标志码：**A **DOI：**10.11804/NuclPhysRev.32.01.01

1 引言

近些年，研究弱束缚核 ^{6,7}Li 和 ^{9}Be 等作为弹核参与的熔合反应一直是实验和理论核物理研究的热点课题[1]。经过大量研究发现，在这些弱束缚核所参与的熔合反应中，与理论计算以及紧束缚核相比，完全熔合在库仑势垒以上能区有着明显的压低，在库仑势垒以下区域则有着可观的增强[2-11]。这些弱束缚核对熔合产生的影响吸引着人们更多地去探究背后的原因与物理机制。当弱束缚核作为弹核参与核反应时，由于较低的破裂阈值，很容易在与靶核发生熔合反应之前便破裂成多个碎片；此外弹核与靶核之间还会发生转移反应，生成类弹核和类靶核，比如 ^{208}Pb (^{7}Li, ^{6}Li) ^{209}Pb、^{208}Pb (^{6}Li, ^{5}Li) ^{209}Pb[12] 等，这些类弹核同样也会发生破裂反应。因此在弱束缚核熔合反应过程中存在直接破裂和转移破裂两种破裂反应道。由于破裂反应道的存在，导致弹核和类弹核被靶核或者类靶核完全俘获的概率下降，从而压低了完全熔合截面（Complete Fusion, CF），增大了非完全熔合截面（Incomplete Fusion, ICF）。但是对于不同破裂反应道，例如中子转移破裂、质子转移破裂、直接破裂等，发生的概率以及对熔合截面的影响是不相同的，因此进一步研究弱束缚核熔合反应过程中不同破裂反应道机制是十分必要的[13-16]。

收稿日期：2024-02-04； **修改日期：**2024-02-04
基金项目：国家自然科学基金资助项目（11975040, U2167204）
作者简介：吴艳松 (1997–)，男，安徽安庆人，博士研究生，从事实验核物理研究；E-mail: wuyansong@buaa.edu.cn

目前国内外已开展了相关弱束缚核破裂反应机制研究的实验，主要测量方法是通过在线带电粒子测量，鉴别出不同破裂反应道, 并通过理论模型[17-18] 将各破裂反应道的破裂概率从垒下能区外推到垒上能区。本文将围绕以下部分展开论述：第二部分：主要的实验测量方法，第三部分：近年来国内外研究进展，第四部分：本课题组开展的相关工作，第五部分：总结与展望。

2 实验测量方法

目前涉及到的 ^{6,7}Li 和 ^{9}Be 等弱束缚核破裂反应机制研究，主要是通过在线带电粒子测量方法，利用位置灵敏探测器（一般为硅条探测器）测量反应过程中发射的带电粒子，并给出粒子准确的散射角度 θ 和能量信息。根据实验需求，可以进一步开展符合测量，利用两体动力学计算挑选出真实符合事件，并结合相关物理量开展后续分析。例如通过两个破裂碎片的能量，就可以计算出破裂反应道的 Q 值。具体计算公式为：

$$Q = E_1 + E_2 + E_{recoil} - E_{lab} \tag{1}$$

其中 E_1、E_2 为两个破裂碎片的动能，E_{recoil} 为靶核（可能发生转移反应产生类靶核）的反冲能，E_{lab} 为入射粒子动能, 其中 E_{recoil} 可以由动量守恒定理可知。至此我们可以计算得出不同破裂反应道的 Q 值，并很好地再现破裂反应的 Q 值谱。当反应前后的粒子都处于基态时，这时反应的 Q 值一般被写作 Q_{gg}，Q_{gg} 是一个已知量。当反应后的粒子处于激发态时，拥有激发能 E_x, 此时的 Q

值为:

$$Q = Q_{gg} - E_x \tag{2}$$

在实验中, 探测到的碎片都是处于基态, 反冲的靶核 (类靶核) 可能处于激发态, 因此可以通过重建不同破裂反应 Q 值谱, 进一步确定反冲的靶核 (类靶核) 能级信息, 从而开展下一步研究。

在破裂反应中, 除了靶核 (类靶核) 可能处于激发态, 破裂前的弹核 (类弹核) 也可能处于激发态, 由于弹核 (类弹核) 激发态寿命很短, 我们很难直接探测到, 一般采用破裂碎片的相对能量来进行鉴定。在弹核 (类弹核) 破裂过程中如果没有外力作用, 破裂碎片的相对能量可以通过以下公式计算:

$$E_{rel} = Q_{BU} + E_{P,x} + \Delta E_{T,C} \tag{3}$$

式中 Q_{BU}、$E_{P,x}$ 分别为破裂反应的反应能和弹核 (类弹核) 激发能, $\Delta E_{T,C}$ 为相对能修正项, 与弹核 (类弹核) 破裂位置有关。当弹核 (类弹核) 远离靶核 (类靶核) 破裂时, 不会受到库仑场的作用, 此时 $\Delta E_{T,C}$ 为 0, 对应的 E_{rel} 可以呈现出一个峰结构。而当其靠近靶核 (类靶核) 破裂时, 会受到库仑场的影响, 改变碎片移动方向, 此时 $\Delta E_{T,C}$ 不为 0, 是一个连续分布的值, 对应的 E_{rel} 会呈现一个很宽的分布。因此破裂碎片的相对能谱可以很好地描述弹核 (类弹核) 的末态, 当然在这个分析过程中, 我们需要考虑末态寿命的影响。

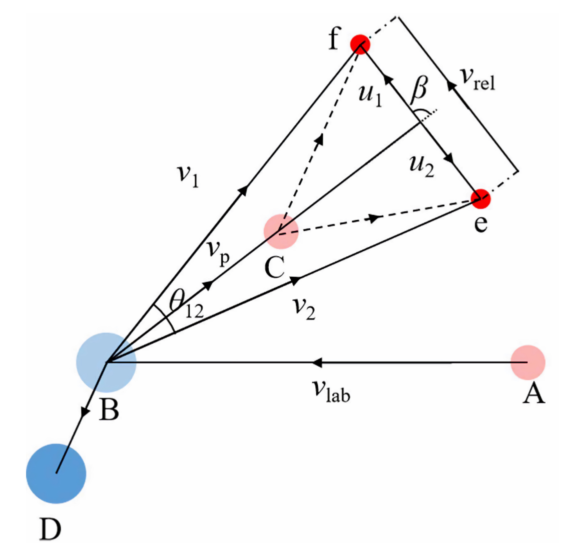


图 1 (在线彩图) 类弹核破裂成碎片示意图

如图1所示, A 为弹核, B 为靶核, C 为类弹核, D 为类靶核, e、f 分别为两个破裂碎片。破裂碎片的相对能量可以表达为: $E_{rel}=E_{1,c}+E_{2,c}$, 其中 $E_{1,c}$、$E_{2,c}$ 是两个碎片在以类弹核为质心系下的能量, 我们可以通过已知量和测量的物理量进一步得到碎片相对能的计算公式:

$$E_{rel} = \frac{m_1 E_2 + m_2 E_1 - 2\sqrt{m_1 E_1 m_2 E_2}\cos\theta_{12}}{m_1 + m_2} \tag{4}$$

其中 θ_{12} 为两个破裂碎片在实验室系下的相对夹角, 可以通过破裂碎片的散射角和方位角计算得到。通过两体动力学计算, 我们还可以得到弹核 (类弹核) 在实验室下发射角度、两个破裂碎片在以类弹核为质心的相对动量方向夹角等物理信息。通过对在线带电粒子的动力学测量, 我们可以得到很多有用的物理信息, 并完成带电粒子来源分析和破裂反应道鉴别, 从而进一步帮助我们更加清楚地重现破裂反应过程[18-20]。

3 近年来国内外研究进展

本节主要介绍近二十年来, 国内外关于弱束缚核作为炮弹的破裂反应研究, 一方面想利用符合测量方法, 从实验上鉴别不同的破裂反应道, 探究不同破裂反应道对于熔合压低的影响; 一方面利用两体动力学计算得到的物理信息, 确定弹核 (类弹核)、靶核 (类靶核) 的末态信息, 提取近靶破裂和共振破裂截面, 进一步探究破裂反应机制; 另外, 破裂反应引起的非完全熔合过程与转移反应过程都可能会对完全熔合截面造成影响[21], 目前围绕这个问题利用其他符合测量方法, 开展了一些实验研究, 并得出了相关结论。

2002 年, Hinde D.J 等人给出了 ^{9}Be+^{nat}Pb 实验中各破裂反应道的概率[22], 并认为 ^{8}Be 的破裂可以分为两种: 一种是瞬时破裂 (Prompt Breakup), 一种是长寿命的基态 ^{8}Be ($T_{1/2}$≈10^{-16}s) 的延时破裂 (Delayed Breakup), 并得出结论: 弱束缚核熔合反应中垒上完全熔合压低现象是由反应中的瞬时破裂导致的, 此外推测 ^{9}Be 垒上完全熔合压低因子与靶核的电荷息息相关。2010 年, R.Rafiei 等人报道了同样的实验测量结果[23], 束流为 ^{9}Be, 靶核分别为: ^{209}Bi、^{208}PbS、^{196}Pt、^{186}W、^{168}Er、^{144}Sm, 并通过两体动力学计算, 对符合的 α 粒子进行 Q 值重构, 并计算得到了破裂碎片相对能谱。通过将符合 α 粒子的 Q 值谱与相对能量 E_{rel} 谱进行关联, 鉴别出了不同破裂反应道。图2展示了 ^{9}Be+^{209}Bi 在 E_{cm}=35.38 MeV 和 26.73 MeV 能量下 Q-E_{rel} 的关联谱, 并认为图中的 5 个区域分别对应不同的破裂反应道。区域 1 事件来源于基态 ^{8}Be 的破裂; 区域 2 事件来源于激发态 ^{8}Be 的破裂; 区域 3 事件来源于激发态 ^{9}Be 的破裂, 破裂产物除了探测到的 α 粒子以外还有一个中子, 破裂过程可以认为是激发态 ^{9}Be 先破裂成基态 ^{8}Be 加一个中子, 后续基态 ^{8}Be 再破裂成两个 α 粒子; 区域 4 的事件来源于 $5/2^-$ 共振态 ^{9}Be 的破裂; 区域 5 的事件来源于激发态 ^{9}Be 的破裂。并认

为区域 2 和区域 5 的事件为瞬时破裂，可以对垒上完全熔合压低起作用，得出了与 Hinde D.J 等人相同的结论。弱束缚核熔合反应中的垒上完全熔合压低现象主要是由弱束缚核转移核子形成的类弹核发生瞬时破裂导致的。D.H.Luong 等人在 2011 年发表的文章中[12]，利用带电粒子符合测量的方法，分别得到 ^{6}Li+^{208}Pb、^{7}Li+^{208}Pb 系统下不同破裂反应道的 Q 值谱和破裂碎片相对能谱，得到了靶核（类靶核）、弹核（类弹核）的激发态信息，给出了各个破裂反应道中瞬时破裂的占比，并指出转移反应产生类弹核的破裂是占主要的。另外在分析过程中，引入了破裂时标的概念，如图3所示，进而鉴别了瞬时破裂和延时破裂过程，为进一步探究破裂反应机制提供了新的思路。

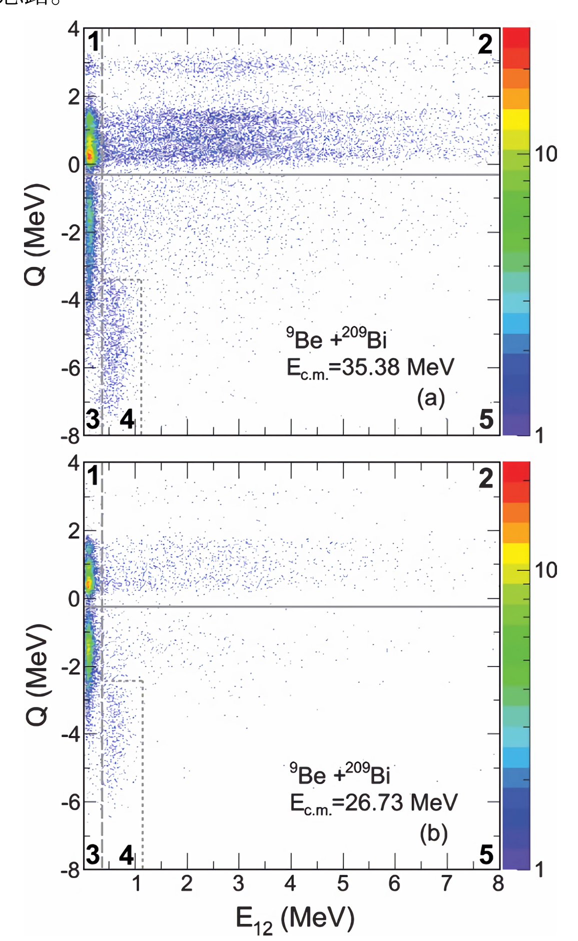


图 2　(在线彩图) ^{9}Be+^{209}Bi 中符合 α 粒子 Q-E_{rel} 关联谱[23]

D.H.Luong 基于 2011 年的工作，2013 年系统整理了 ^{6,7}Li 在 ^{144}Sm,、^{207,208}Pb、^{209}Bi 靶核上的实验结果[18]，通过符合测量，重构了不同体系下的破裂反应 Q 值谱和相对能 E_{rel} 谱，最后得出了各个反应体系的瞬时破裂中每个破裂反应道占有的比例，从而得到每个体系中对熔合影响最大的破裂反应道。Sunil Kalkal 选用了轻质量的靶 ^{58}Ni 和 ^{64}Zn[19]，束流为 ^{6,7}Li，通过对破裂碎片角度和能量进行符合测量，并将得到的破裂碎片相对能谱与其他重靶体系下的结果进行对比，发现 ^{7}Li 在撞击轻质量靶不会破裂成 α 和 t，而 ^{6}Li 撞击不同质量的靶破裂成 α 和 d 的相对能量谱也有着很大差别。为了进一步区分不同破裂成分，Sunil Kalkal 进行了破裂碎片的角度关联，明显观察到了 ^{6,7}Li 延时破裂带子结构，分别对应 ^{6}Li 的 3^{+} 态和 ^{7}Li 的 $7/2^{-}$ 态，这种处于类弹核共振态下的延时破裂又称之为共振破裂，而靠近类靶核的瞬时破裂又称之为近靶破裂，两种成分在角度关联谱上可以很好地被鉴别开，如图4所示。因此从实验角度上得到了不同体系下共振破裂和近靶破裂的比例，并进行了模拟验证。最后得出相关结论：^{6}Li 在与不同质量的靶发生反应时，直接破裂的模式是极为不同的，在与轻质量靶发生反应时共振破裂起到了更大的作用；而且 ^{7}Li 和 ^{6}Li 与重质量靶发生反应时的直接破裂的模式也不一样。Sunil Kalkal 分析认为这可能是和 ^{6}Li 的激发态相比，^{7}Li 的激发态的激发能远大于直接破裂的阈值。另外，在 ^{6}Li 与轻质量靶发生反应时，直接破裂中的近靶破裂的比例极小，这表明直接破裂反应道不会对熔合反应产生影响。

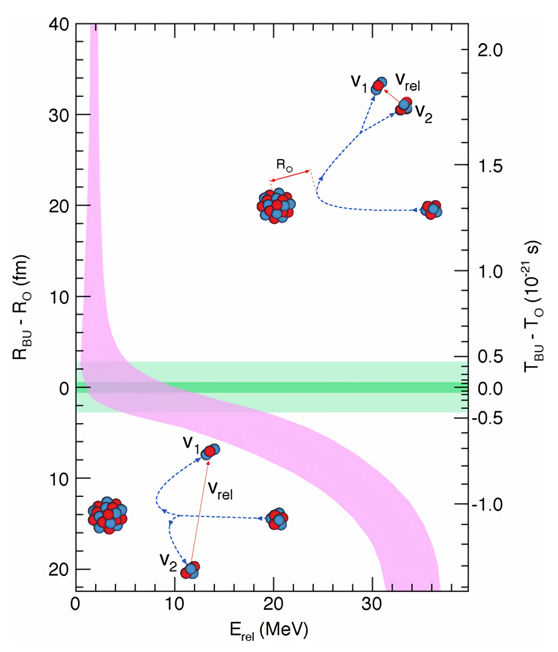


图 3　(在线彩图) 碎片相对能 E_{rel} 与破裂距离、破裂反应时间关联图[12]

S.Santra 等人在 ^{6}Li+^{209}Bi 实验中[24] 对发射出来的 α 粒子和 d 粒子进行符合测量，从实验上给出了 ^{6}Li-α+d 共振破裂和近靶破裂的截面角分布（其文章中描述为：Sequential、Direct 破裂），如图5所示，并用理论模型进行 CDCC（Continuum Discretized Coupled Channels）计算，认为在 ^{6}Li-α+d 破裂反应道中，3^{+} 态 ^{6}Li 的共振破裂是占主要的。将共振破裂截面和近靶破裂截面结果同单举 α 截面结果比较，认为在这个过程中可能存在其他

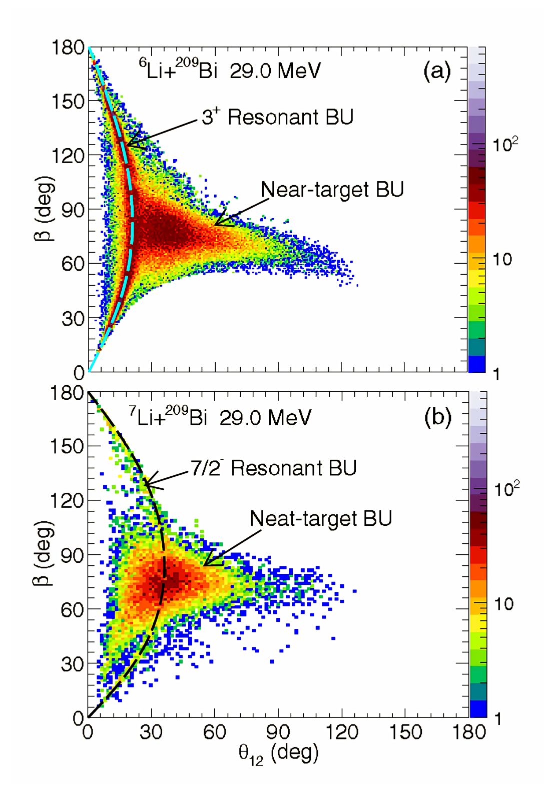


图 4 ^{6,7}Li+^{209}Bi 在 29 MeV 下直接破裂角关联结果[19]

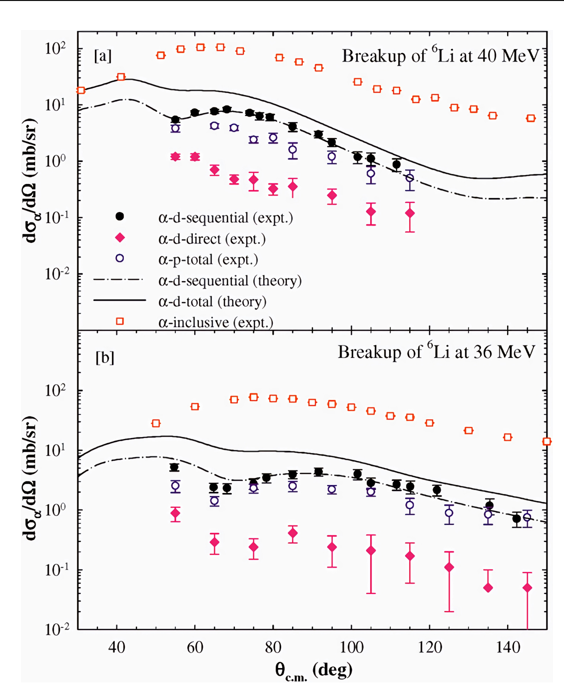


图 5 (在线彩图) 单举 α 截面角分布和相关破裂反应道截面角分布[24]

破裂反应道的贡献，因此进一步研究其破裂反应机制是十分有意义的。D. Chattopadhyay 在近期的 ^{6}Li+^{112}Sn 工作中[25]，观察到了破裂碎片 α 和 ^{3}He 的符合事件，发现了新的破裂反应道，并在相对能谱中首次观察到了 ^{7}Be 的 7/2$^-$ 和 5/2$^-$ 激发态，分别给出了近靶破裂和 7/2$^-$ 和 5/2$^-$ 共振破裂截面角分布，与理论模型计算结果吻合较好，为单举 α 粒子的来源提供了一种新的解释。

为了对弱束缚核破裂机制进一步研究，Shrivastava 等人在 ^{7}Li+^{198}Pt 实验中[26]，利用带电粒子-γ 射线符合测量方法，通过 γ 射线和带电粒子开窗，确定了类靶核信息，并提取了相关反应道截面。同时观察到了 ^{5,6}He 大集团转移的现象，并利用相关动力学理论模型对实验数据进行了验证和计算，阐明了 ^{7}Li 不同集团结构在近垒能区的动力学计算中的重要性，为弱束缚核破裂机制的实验研究提供了新的测量方法。COOK 在 2016 年的工作中[20] 利用动力学模型模拟了 ^{9}Be 在不同靶上的破裂过程，并考虑了破裂时标的影响，得出结论，考虑类弹核激发态寿命对于重现破裂过程是十分重要的，并通过计算指出，破裂反应对于完全熔合截面压低因子的影响只有 9%，没有达到理论上的 30%，推测主要的压低是因为一步转移过程引起的。为了进一步验证该结论，COOK 等人开展了 ^{7}Li+^{209}Bi[21] 实验研究，通过带电粒子符合测量方法得到了两个破裂粒子均未被俘获的所有破裂反应道截面，约为 36 ±1 mb，其反应道贡献的 α 粒子称为 No-Capture Breakup (NCBU) α。在该反应道截面中扣除不会对完全熔合截面产生压低的延迟破裂成分后，该截面约为 20 mb，相比于已有的相同体系下的非完全熔合截面 302 ±21 mb[14]，仅占一小部分，不能完全解释非完全熔合截面来源，指出应该有其他反应道对于非完全熔合截面的贡献。得到实验中没有粒子与之符合的 α 粒子能量和角度分布二维谱，称为 Unaccompanied α，并与 NCBU α 分布对比，发现 Unaccompanied α 呈现能量更高、角度更前倾现象。通过模型计算给出了当其中一个破裂碎片被俘获后，产生的俘获破裂 α 粒子角分布，称之为 Breakup Capture(BUC) α，其分布在后角成峰，与现有的 Unaccompanied α 角分布趋势明显不同，如图6所示，并指出这个矛盾是由于 α 粒子来源于不同的反应机制造成的。经过进一步研究发现，非完全熔合过程生成的 Po 同位素，仅有一小部分来源于弹核破裂再熔合过程，主要是来源于 t 的直接转移过程，由此得出结论：完全熔合截面的压低主要是弱束缚核中集团转移的影响，而不是弹核破裂机制影响的。

4 本课题组开展的相关工作

近期本课题组在中国原子能科学研究院的串列加速器上，使用 30 MeV、40 MeV 和 47 MeV 的 ^{6,7}Li 束流轰击 210 μg/cm^2 的 ^{209}Bi 靶[27]，通过覆盖大立体角的硅探测器阵列来实现带电粒子的符合测量。通过望远镜探测器系统清晰地实现了带电粒子的鉴别，并通过动力学符合测量计算，如图7所示，成功地在近垒和垒上能区鉴别

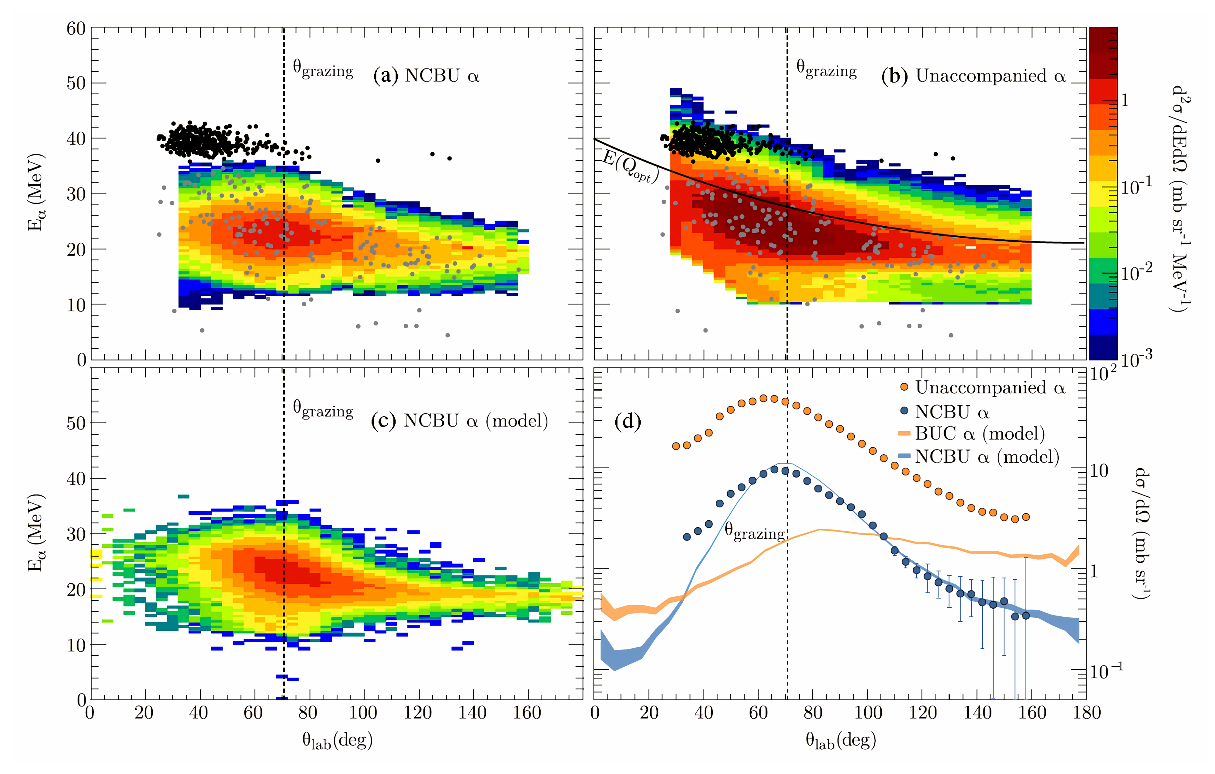


图 6　^{7}Li+^{209}Bi 实验中 α 粒子角分布[21]

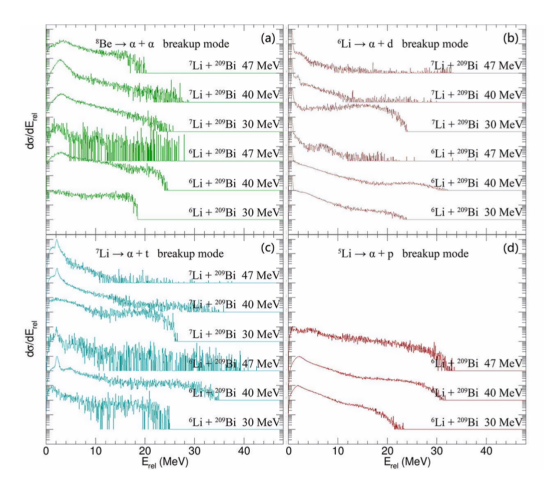


图 7　^{6,7}Li+^{209}Bi 不同入射能量下相对能谱对比[27]

出 α+α，α+t，α+d，α+p 四种破裂反应道，并给出了不同破裂反应道事件在总的破裂事件中的比例。值得注意的是，在 30 MeV，^{6}Li+^{209}Bi 实验数据中，我们新观察到了 α+t 破裂符合事件，说明在近垒能区，^{6}Li 的 1n 拾取过程是不可以被忽略的。目前课题组在 ^{6}Li+^{209}Bi 实验数据中新发现了 α+^{3}He 破裂反应道，进一步验证了反应过程中 ^{7}Be 的产生，为该体系下的 1p 拾取提供实验证据。我们利用重构的破裂反应 Q 值谱，可以进一步确定 ^{210}Bi、^{208}Bi、^{208}Pb 等类靶核的末态信息，如图8所示，展示了三个能量点下 ^{7}Li+^{209}Bi 中 α+α 符合事件重构的 Q 值谱，Q_{gg}=13.57 MeV，我们可观察到 ^{208}Pb 的不同激发态结构，从而为我们进一步分析单核子转移机制提供了新的手段，最新的工作仍然在进行中。

利用两体动力学计算得到的角度信息，我们可以给出破裂碎片角度关联图像，如图9所示，图中 θ_{12} 为两个破裂碎片在实验室系下出射方向相对夹角，β 为两个碎片在以类弹核为质心下相对动量方向夹角，具体可参见图1。我们可以明显观察到 ^{6}Li+^{209}Bi 中 ^{8}Be 的基态和第一激发态结构，结合破裂相对能谱，我们可以清晰的分辨瞬时破裂和延时破裂结构，并可进一步提取截面信息。值得注意的是，与其他开展的工作相比，我们在 30 MeV，^{6}Li+^{209}Bi 数据中，首次观测到了 ^{8}Be 的第一激发态结构。发现随着入射能量的变化，^{8}Be 的破裂反应道中瞬时破裂和延时破裂成分的占比会发生变化，我们推测可能是因为不同能量的束流造成作用时间的变化，处于激发态的类弹核破裂的位置发生变化，从而导致不同破裂成分的占比会改变，这个过程也是与类弹核激发态寿命息息相关的，目前进一步的分析仍在进行中。

5　总结与展望

本文主要介绍了目前弱束缚核破裂反应机制的测量方法，并整理了目前国内外相关实验研究。由于弱束缚核的结合能较低，其作为弹核参与的重离子熔合反应过程存在众多机制。目前开展的实验研究中，主要是通过

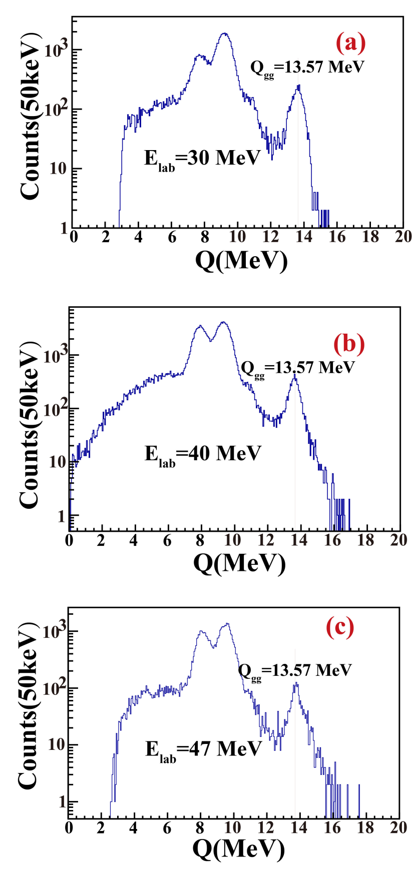


图 8 ^{7}Li+^{209}Bi 不同入射能量下 $\alpha+\alpha$ 符合事件 Q 值谱

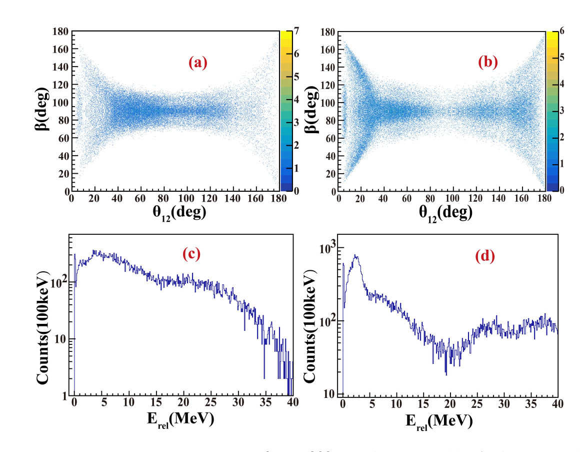


图 9 30 MeV、40MeV 下 ^{6}Li+^{209}Bi 中 $\alpha+\alpha$ 符合角关联谱及相对能谱，(a)、(b) 分别为 30 MeV,40 MeV 能量下破裂碎片角关联谱，(c)、(d) 分别为 30 MeV,40 MeV 能量下破裂碎片相对能谱谱

符合测量等多种手段，对熔合反应过程中存在的各种破裂过程进行了鉴别，并解释了单举 α 粒子的来源，一定程度上解释了各种破裂过程对于熔合压低的影响，但是目前的实验数据主要集中在垒下或者近垒能区，对于垒上的破裂机制研究数据较少；从破裂反应 Q 值谱提供的物理图像，结合带电粒子-γ 符合测量方法，很好地描述破裂反应后类靶核末态信息，从而为单核子转移机制研究等提供新的视角；我们可以从相对能谱中提取弹核（类弹核）的末态信息，结合末态寿命，鉴别瞬时破裂和延时破裂成分，进一步对熔合截面压低做出解释，同时可以进一步探究背后的破裂反应机制。

由于破裂反应引起的非完全熔合过程与转移反应过程都可能会对完全熔合截面造成影响[21]，如果可以进一步鉴别和提取两个反应过程的截面，会极大地帮助我们理解这两个过程对于完全熔合截面的影响。但是目前从实验的角度上实现非完全熔合与转移反应产物仍存在困难，我们需要在实验装置和测量方法等方面进行提升。在以后的研究工作中，本课题组也会进一步利用带电粒子-γ 符合测量方法开展原子核反应机制方面的研究。

参考文献

[1] KEELEY N, RAABE R, ALAMANOS N, et al. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2007, 59(2): 579. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641007000397. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2007.02.002.

[2] HUSSEIN M S, PATO M P, CANTO L F, et al. Phys Rev C, 1992, 46: 377. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.46.377.

[3] TAKIGAWA N, KURATANI M, SAGAWA H. Phys Rev C, 1993, 47: R2470. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.47.R2470.

[4] DASSO C H, VITTURI@F A. Phys Rev C, 1994, 50: R12. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.50.R12.

[5] HAGINO K, VITTURI A, DASSO C H, et al. Phys Rev C, 1999, 61 (3).

[6] DIAZ-TORRES A, THOMPSON I J. Phys Rev C, 2001, 65(2).

[7] TAKAHASHI J, MUNHOZ M, SZANTO E M, et al. Phys Rev Lett, 1997, 78: 30. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.78.30.

[8] JJ. K, PETERSON D, SANTI P, et al. Phys Rev Lett, 1998(21): 81.

[9] SIGNORINI C, LIU Z H, LI Z C, et al. The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei, 1999, 5(1): 7.

[10] MORAES S B, GOMES P R S, LUBIAN J, et al. Phys Rev C, 2000, 61: 064608. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.61.064608.

[11] TROTTA M, SIDA J L, ALAMANOS N, et al. Phys Rev Lett, 2000, 84(11): 2342.

[12] LUONG D H, DASGUPTA M, HINDE D J, et al. Phys Lett B, 2011, 695(1-4): 105.

[13] AGUILERA E F, KOLATA J J, NUNES F M, et al. Phys Rev Lett, 2000, 84: 5058. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.84.5058.

[14] DASGUPTA M, GOMES P R, HINDE D J, et al. Phys Rev C, 2004, 70(70).

[15] GOMES P R S, PADRON I, CREMA E, et al. Phys Rev C, 2006, 73: 064606. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.73.064606.

[16] MUKHERJEE A, ROY S, PRADHAN M K, et al. Phys Lett B, 2006, 636(2): 91.

[17] DASGUPTA M, HINDE D J, BUTT R D, et al. Phys Rev Lett, 1999, 82.

[18] LUONG D H, DASGUPTA M, HINDE D J, et al. Phys Rev C, 2013, 88(3): 034609.

[19] KALKAL S, SIMPSON E C, LUONG D H, et al. Phys Rev C, 2016,

93.

[20] COOK K J, SIMPSON E C, LUONG D H, et al. Phys Rev C, 2016, 93: 064604. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.93.064604.

[21] COOK K J, SIMPSON E C, BEZZINA L T, et al. Phys Rev Lett, 2019, 122: 102501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.122.102501.

[22] HINDE D J, DASGUPTA M, FULTON B R, et al. Phys Rev Lett, 2002, 89(27): 272701.

[23] RAFIEI R, RIETZ R D, LUONG D H, et al. Phys Rev C, 2010.

[24] SANTRA S, PARKAR V V, RAMACHANDRAN K, et al. Phys Lett B, 2009, 677(3-4): 139.

[25] CHATTOPADHYAY D, SANTRA S, PAL A, et al. Phys Rev C, 2020, 102. DOI: 10.1103/PhysRevC.102.021601.

[26] SHRIVASTAVA A, NAVIN A, DIAZ-TORRES A, et al. Phys Lett B, 2013, 718(3): 931. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269312012300. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.11.064.

[27] Yong-jin Yao, Cheng-Jian Lin, Lei Yang, et al. Chinese Physics C, 2021, 45(5): 8. (in Chinese)
(姚永进, 林承键, 杨磊, 等. 中国物理 C：英文版, 2021, 45(5): 8.)

Study on the Breakup Mechanism of Weakly Bound Nuclei

WU YanSong[1], ZHANG GaoLong[1], ZHANG GuangXin[2], Lin ChengJian[3], Yang Lei[3], Lyu HaoBo[1], Jiao ZhenWei[1], Wang MingLi[1]

(*1. School of Physics, BeiHang University, Beijing 102206, China;*
2. Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, GuangDong, China;
3. China Institute of Auomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The nuclear reaction at energies near the Coulomb barrier is an effective way to study the interaction between nuclear structure and dynamics. As more exotic weakly bound nuclei become accessible at new accelerator facilities, it is becoming critically important to understand the influence of weak binding energy on reaction dynamics, including on fusion. At present, a large number of experiments have shown that the complete fusion cross section between stable weakly bound nuclei such as ^{6,7}Li, ^{9}Be and heavy mass target nuclei is suppressed about 30% lower than the fusion cross section calculated by existing theoretical models and the fusion cross-section derived from tightly bound nuclear systems. In order to investigate the breakup effect of weakly bound nuclei on the suppression of the complete fusion cross section, studying the breakup reaction and mechanism of weakly bound nuclei has become concerned. This article introduces the recent work on breakup of weakly bound nuclei, including the research of our group.

Key words: weakly bound nucleus; complete fusion cross section; suppression factor; breakup

Received date: 04 Feb. 2024; **Revised date:** 04 Feb. 2024
Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11975040, U2167204)